

PRÉ-PROCESSAMENTO DE MODELO DE VEÍCULO ASMO PARA ESTUDO DE DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Yzlla Rhavena Lucena*

Marcos Vinícius Cândido Henriques**

Resumo: A dinâmica de fluidos computacional é uma ferramenta de simulação numérica que vem ganhando cada vez mais espaço em indústrias nas quais é crucial o estudo de processos físicos que envolvem escoamento, envolvendo a solução numérica das equações de Navier-Stokes. Esse avanço tem sido impulsionado pela recente evolução do poder de processamento dos computadores. No entanto, muitos desafios numéricos devem ser vencidos para se chegar a uma análise de dinâmica de fluidos computacional que seja fiel à realidade. Neste trabalho, aborda-se uma das principais dificuldades relacionadas à modelagem tridimensional de veículos automotivos em túneis de vento: o pré-processamento da malha que representa a geometria do veículos. Partimos de um modelo simples de carro desenvolvido com fins didáticos pela Daimler-Benz: o ASMO. Foram aplicados, com o auxílio do *software* de código livre *Meshlab*, algoritmos de simplificação e subdivisão na tentativa de adequar a malha à posterior solução numérica das equações de escoamento pelo *software* especializado. Demonstra-se, a partir de análises de qualidade dos triângulos que compõem a malha, que a malha processada possui uma qualidade superior ao protótipo inicial.

Palavras-chave: Dinâmica de fluidos computacional, geração de malha, triangulação, túnel de vento.

Abstract: Computational fluid dynamics is a numerical simulation tool that has been gaining more and more space in industries in which the study of physical processes involving flows, involving the numerical solution of “Navier-Stokes equations”, is crucial. This advance has been driven by the recent evolution of the processing power of computers. However, many numerical challenges must be overcome to arrive at a computational fluids dynamic analysis that is accurate. This work addresses one of the main difficulties related to the three-dimensional modeling of automotive vehicles in wind tunnels: the pre-processing of the mesh that represents the geometry of the vehicles. We started from a simple car model developed for didactic purposes by Daimler-Benz: the ASMO. Simplification and subdivision algorithms were applied, with the help of the free code software Meshlab, to adapt the mesh to the subsequent numerical solution of the flow equations by specialized software. It is demonstrated, from analysis of quality of the triangles that compose the mesh, that the processed mesh has a higher quality than the original model.

Keywords: computational fluid dynamics, mesh generation, triangulation, wind tunnel.

* [Graduanda na Universidade Federal Rural do Semi-Árido. E-mail: yzllarhavena@gmail.com](#)

** [Professor do Magistério Superior – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. E-mail: viniciuscandido@ufersa.edu.br](#)

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica de fluidos computacional (DFC)¹, também conhecida por fluidodinâmica computacional, trata da simulação numérica de processos químicos e físicos que apresentam escoamento. Sua origem é da junção de duas disciplinas a mecânica do fluidos, parte física que estuda os efeitos de força nos fluidos², em conjunto com a disciplina cálculo numérico, que trata de estudos por algoritmos de aproximação para soluções de problemas matemáticos. Ela é amplamente aplicada por conta das informações obtidas tais como perfis de velocidade, pressão e temperatura entre outras relações, por usar programas computacionais ela otimiza o tempo, e barateia custos através de programas gratuitos e não gratuitos, que seriam aplicados em testes que requer estruturas específicas.

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos de engenharia e física é realidade, graças ao grande avanço tecnológico que trouxe uma potenciação das máquinas, computadores com alta velocidade e maiores capacidades de armazenamento, em função da disponibilidade das ferramentas de execução, e por sua versatilidade e simplicidade de aplicação das técnicas a DFC recebe atenção de engenheiros e analistas, que podem optar por trabalhar em casa em seus computadores pessoais.

Por utilizar recursos próprios, o gasto será referente somente ao uso do computador, pois os softwares são disponibilizados gratuitamente e são de fácil acesso aos interessados na área, além de ter plataformas de apoio que também disponibilizam modelos diversos em 3D para uso pessoal e para fins acadêmicos.

Por tratar de uma capacitação com aplicações ampla, a DFC é de suma importância pois une de maneira prática disciplinas vistas no âmbito acadêmico, e ter a experiência na faculdade antes de ingressar no mercado de trabalho garante uma certa autoridade como engenheiro. Na indústria de produção de veículos, a aplicação da DFC é de suma importância, uma vez que diminui substancialmente o gasto com túneis de vento.

Se trata de um estudo amplo e aplicado em diversas áreas como a química, física entre outras, a DFC permite análises dos fluidos tridimensionais através da modelagem e simulações, podemos simplificar em etapas simples inicialmente com a escolha de uma geometria que representa o fenômeno, e então a solução matemática das equações diferenciais, equações constitutivas e condições de contorno associadas ao fenômeno e por

¹ DFC é a sigla em português, que substitui CFD.

² Fluido pode ser definido como sendo uma substância que se deforma continuamente quando submetido a uma tensão de cisalhamento (tangencial), por menor que seja essa tensão.

fim, apresentação visual dos resultados, o resultado final é composto de gráficos de propriedades no espaço que podem levar a conclusões fortemente associadas com a geometria do problema.

Ao longo do tempo com o avanço da tecnologia as formas geométricas dos carros foram se adaptando, com o progresso da aerodinâmica, melhorando na eficiência, visando desde o aumento da velocidade e a economia de combustível, e também usando menos do material que constitui os automóveis, afetando diretamente na economia.

A adequação de modelos tridimensionais de carros disponibilizados por repositórios virtuais em plataformas gratuitas para o uso em dinâmica de fluidos computacional é um tema pouco explorado em cursos de ciência e tecnologia do ensino superior. O presente estudo tem como objetivo auxiliar e motivar alunos de graduação a embarcar na ampla área de estudo que a DFC engloba. Tais plataformas estimulam a troca de informações dos usuários cadastrados, para realizar um estudo de dinâmicas dos fluidos computacionais. Com a crescente concorrência de mercado, profissionais da área de engenharia mecânica buscam aperfeiçoamento e melhorias no currículo para obtenção de oportunidades de trabalho. A Dinâmica de Fluidos Computacional é uma alavanca no currículo nesse cenário de competição.

2. DESENVOLVIMENTO

As equações de Navier Stokes são equações diferenciais parciais que descrevem o escoamento dos fluidos, a partir dessas equações pode-se determinar campos de velocidade e pressão num escoamento. Na prática somente casos simples podem ser resolvidos analiticamente, estas são equações parciais não-lineares em praticamente em todos os casos reais, em que dificulta na solução das equações. Algumas simplificações podem ser feitas nas equações de Navier Stokes. A obtenção das equações de Navier-Stokes é através da aplicação da segunda lei de Newton a um elemento de fluido em um escoamento, considerando todas as forças atuantes e considerando o fluido newtoniano fluidos para quais a tensão de cisalhamento é linearmente proporcional à taxa de deformação de cisalhamento e que são regidos por 2 leis a conservação da massa e a conservação da quantidade de movimento obtemos a equação 1.

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{V} \quad (1)$$

A partir das equações simplificadas escolhe-se um método para particionar e torná-las menos complexas para obtenção de soluções aproximadas em um computador. Indubitavelmente a geração de uma malha de qualidade que defina em todo o domínio computacional as células nas quais os fatores de escoamento (velocidade, pressão e etc.) são calculadas é a parte mais importante para solução de dinâmica dos fluidos computacionais (CENGEL & CIMBALA, 2007).

A equação de Navier-Stokes pode ser solucionada numericamente a partir de métodos numéricos computacionais. O método numérico mais comum de mecânica dos fluidos na indústria é o dos Método dos Volumes Finitos. Esse método consiste em dividir o domínio computacional do problema em células discretas, representando pequenos volumes nas quais leis de conservação da massa, momento e energia devem ser satisfeitos. Para isso, faz-se necessário, a partir da geometria tridimensional dos objetos que servem como obstáculo ao escoamento do fluido, a criação de uma malha discreta (MALISKA, 2013).

Modelos disponíveis no formato estereolitográfico (STL) (HILLER & LIPSON, 2009) foram priorizados, devido à maior compatibilidade com os programas de computador de CAD e de tratamento de malhas escolhidos para o trabalho. Há também a preocupação em escolher modelos cuja licença de utilização permitam o uso livre em trabalhos acadêmicos, com o devido crédito aos autores da geometria. De acordo com Takagaki (2012), o formato STL (estereolitográfico) descreve as superfícies internas e externas através do contorno da figura 3D, utilizando um conjunto de superfícies triangulares de diversas dimensões e formas. Quanto maior o número de superfícies triangulares utilizadas, maior a precisão da figura. O arquivo STL pode ser binário ou ASCII e basicamente descreve os 3 vértices de cada triângulo, através das suas coordenadas x , y , z ortogonais e algum atributo específico da superfície, em questão. O arquivo STL é genérico para qualquer impressora 3D (TAKAGAKI, 2012, p. 31).

Modelo 3D de veículo escolhido é o ASMO para DFC de geometria simples, obtida a partir do GrabCAD (GRABCAD, 2019), um ambiente livre de colaboração de modelos CAD. O ASMO (*Aerodynamisches Studien Model*) é um modelo tridimensional criado pela Daimler-Benz nos anos 90, com o intuito de testar códigos de DFC em uma geometria simplificada (ALJURE et al., 2014).

Meshlab é o sistema de código aberto para processamento e edição de malhas triangulares 3D, fornece um conjunto de ferramentas para edição, limpeza, cura, inspeção, renderização, texturização e conversão de malhas, pode processar códigos brutos produzidos por ferramentas/dispositivos de digitalização 3D e prepara modelos 3d para impressão. Dispõe de facilidade de uso, a ferramenta é projetada tanto para iniciantes como para usuários

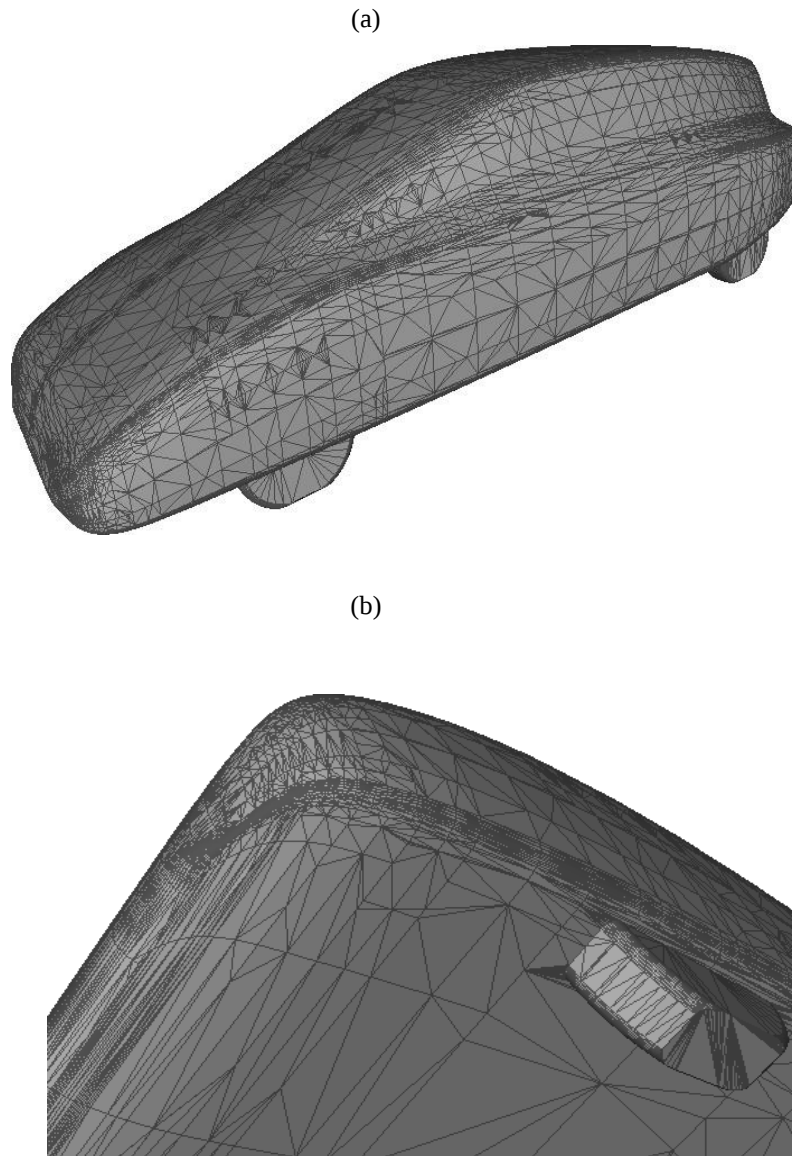
avançados que possam ajustá-las e expandi-las acrescentando funcionalidades ou modificando parâmetros envolvidos (CIGNONI et al., 2008).

As malhas são criadas com o uso de um software especializado, o qual é capaz de abrir o modelo tridimensional e gerar uma malha que representa todo o espaço no entorno do objeto pelo qual o fluido estudado pode escoar. Para a simulação de um túnel de vento, cria-se uma geometria externa em forma de paralelepípedo representando as paredes do túnel e a abertura de entrada e saída do ar, os quais serão interpretados pelo solucionador numérico como condições de borda. Para este trabalho, utiliza-se o software livre Gmsh. O Gmsh é um gerador de malha de elementos finitos 3D gratuito com um mecanismo CAD integrado e pós-processador (GEUZAIN & REMAICLE, 2009). Seu objetivo de design é fornecer uma ferramenta de malha rápida, leve e fácil de usar com entrada paramétrica e recursos avançados de visualização. Gmsh é construído em torno de quatro módulos: geometria, malha, solucionador e pós-processamento.

As malhas criadas a partir deste estudo são adaptadas para o uso no solucionador numérico OPENFOAM. Trata-se de um software livre e de código aberto para dinâmica computacional de fluidos (CFD), de propriedade da OpenFOAM Foundation, e distribuído exclusivamente sob a Licença Pública Geral (GPL) (JASAK et al., 2007). A GPL oferece aos usuários a liberdade de modificar e redistribuir o software e garantir a continuidade do uso gratuito. OpenFOAM® é uma marca registrada da OpenCFD Ltd, licenciada pela OpenFOAM Foundation.

O modelo de trabalho (figuras 1-a e 1-b) obtido possui 10.071 vértices e 20.138 faces. Para evitar divergências numéricas que causam erro na execução da solução numérica no processo DFC, é desejável que os ângulos internos dos triângulos que compõem a geometria tenham um valor mínimo.

Figura 1- Modelo ASMO original (a) e (b) detalhe da roda do modelo ASMO original.



Fonte: Autoria própria (2019)

A geração de malha computacional é um conjunto de pontos identificáveis que representa o domínio físico do problema, atendendo aos métodos numéricos utilizados na solução. Entretanto a solução aproximada será conseguida somente em alguns determinados pontos do domínio e não em todo ele, os domínios são a entrada e saída de vento, correspondentes a dianteira e traseira do modelo ASMO. No entanto leva em consideração dois motivos, o tempo já que a solução numérica de um número demasiado de pontos leva um tempo, e o outro é a qualidade do resultado da malha. Pode ser contraditório porém uma malha com excessivo de concentração de polígonos nem sempre pode-se obter bons resultados já que com números repetidos de cálculos haverá a possibilidade de acúmulos de erros apreciáveis. Sendo

ideal uma malha mais refinada nos locais problemáticos e com menor número em pontos de regiões em que a solução demonstra menores gradientes de variação (FERREIA-IC & JR-PQ, 2015).

Como a malha é uma aproximação da geometria composta por elementos mais simples como triângulos, quadriláteros em casos bidimensionais ou tetraedros, prismas, pirâmides e hexaedros (caso tridimensional). A simplificação tem como objetivo melhorar o desempenho, quanto maior for a área por cada elemento dessa malha, menos elementos são necessários, interferindo diretamente na otimização do tempo.

3. METODOLOGIA

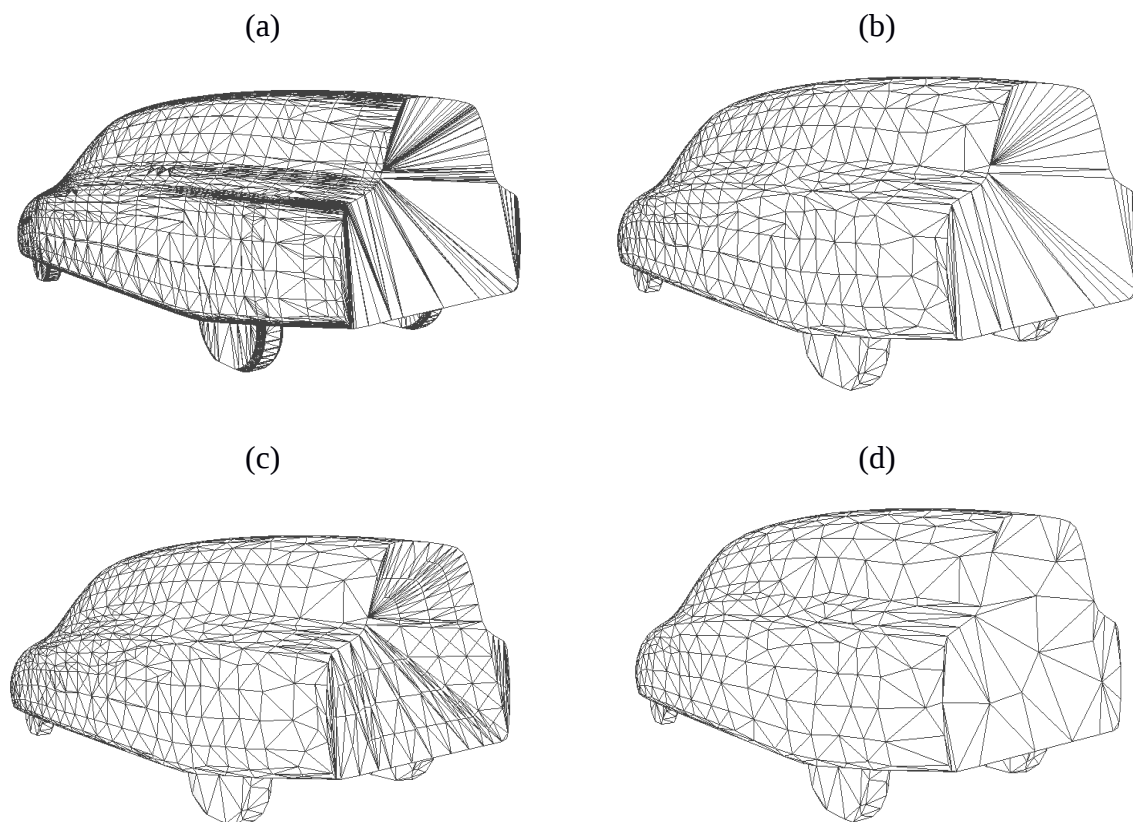
O modelo a ser adequado neste trabalho, o ASMO, foi inicialmente importado para o *Meshlab*. O modelo original tem 10.071 vértices e 20.138 faces. Conforme pode-se observar na figura 2-a, há triângulos grandes que podem gerar erros na análise de DFC.

Por ser útil utilizar modelos mais simples, modelos complexos são simplificados por algoritmos (simplificação de modelos poligonais). Partindo do pressuposto que o modelo é composto somente por triângulos não implica a perda da generalidade, uma vez que o polígono no modelo original pode ser triângulos como uma parte de uma fase de pré-processamento. Portanto para resultados mais confiáveis, quando cantos de duas faces se cruzam em um ponto, as faces devem ser definidas como compartilhamento único, em vez de dois vértices separados que são coincidentes no espaço. Baseado na contração iterativa de pares de vértices (uma generalização da contração da borda). Conforme o algoritmo prossegue uma aproximação de erro geométrico é mantido em cada vértice. Mantendo em cada vértice do modelo atual matrizes quadráticas.

O modelo original da figura 2-a trata-se do ASMO sem ter passado pelo processo de refinamento, com a ajuda do *Meshlab*, aplicou-se o filtro de simplificação na malha original o algoritmo *Quadric Edge Decimation* (GARLAND & HECKBERT, 1997), readaptando os triângulos e reduzindo o número de faces para 3000. O resultado pode ser visto na figura 2-b, Aplica-se um algoritmo de subdivisão simples onde cada aresta é dividida em seu ponto médio, selecionando-se apenas as arestas maiores que determinado limiar absoluto na métrica usada (44,97). Esse algoritmo é útil para refinar uniformemente uma malha substituindo cada triângulo por quatro triângulos menores com 3 iterações. Após esse último procedimento, a malha obtida é mostrada na figura 2-c. Finalmente, simplificamos a malha usando novamente o algoritmo *Quadric Edge Decimation*, reduzindo o número de faces para 2000 e vértices para 1002, como

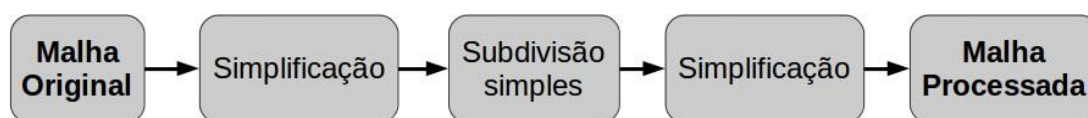
pode ser visto na figura 2-d onde ocorre uma melhor distribuição da geometria. A redução de faces e vértices é significativa devido a geometria da malha ter sido simplificada que implica diretamente na análise pois uma malha com triangulos problematicas, a analise de DFC gera erros por não reconhecer a área coberta por esses triangulos. A figura 3 expõe um fluxograma representando o processamento completo da malha conforme os algoritmos citados. A qualidade da malha tem um efeito considerável na solução numérica em termos de fidelidade do resultado e em tempo de processamento. A análise da qualidade da malha é uma etapa fundamental para se avaliar o quão adequada será a discretização para o problema proposto.

Figura 2 - Malhas do modelo ASMO original (a), após o primeiro procedimento de colapso(b), após a subdivisão (c) e após o último procedimento de colapso (d).



Fonte : Autoria própria (2019)

Figura 3- Fluxograma representando o processo de processamento da malha conforme os algoritmos escolhidos.



Fonte: Autoria própria (2019).

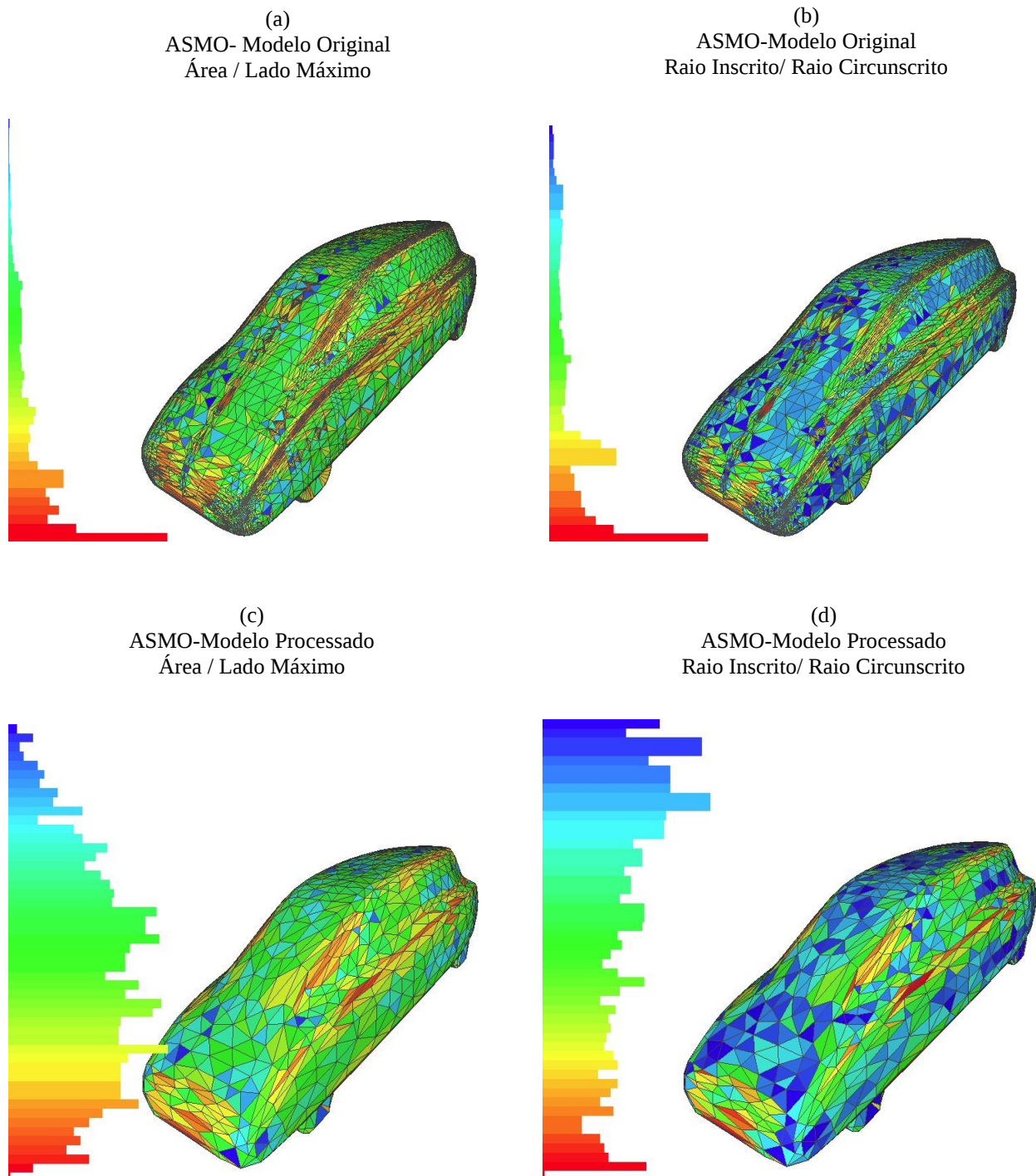
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para este trabalho foram escolhidos dois critérios simples de avaliação da qualidade dos triângulos que compõem a geometria da malha: a razão entre a área e o lado máximo do triângulo e a razão o raio da circunferência inscrita e o raio da circunferência circunscrita. Na figura 4-a, pode-se ver o resultado da análise, em código de cores, usando-se o critério da razão área/lado máximo para o modelo original. Triângulos mais avermelhados são os que apresentam valores menores para essas razões o que implica em baixa qualidade.

Parâmetros de qualidade disponibilizados na plataforma do *Meshlab* em seu menu filtros, na criação e processamentos de cores e após a escolha da duas razões, renderizando em escalas de cores obtém o histograma.

O histograma à esquerda na figura 4-a, denuncia que a maior parte dos triângulos apresentam essa baixa qualidade. Na figura 4-b, pode-se ver o mesmo tipo de análise usando-se o critério do raio inscrito/raio circunscrito. Após o processo de simplificação é observado que os triângulos avermelhados que poderiam gerar complicações foram melhorados; na escala, a distribuição de índices representados pelas cores azul e verde demonstra que houve uma melhoria na qualidade dos triângulos em relação ao modelo original. Na figura 4-c, é possível visualizar a distribuição dos triângulos que foram melhorados. Na figura 4-d a disposição dos triângulos fornece uma análise com elevação dos indicadores que caracterizam uma alta qualidade dos triângulos.

Figura 4 - Análise em código de cores, junto com histograma, da qualidade dos triângulos que compõem a malha da geometria do modelo, segundo os critérios *Área / Lado Máximo* e *Raio Inscrito / Raio Circunscrito*, aplicados aos modelos original, (a) e (b), e processado, (c) e (d).



Com base nos dados expostos na tabela 1 o modelo original dispunha da média de todos os triângulos resultando em 0,175117 após o modelo ser processado, a razão Área/ Lado Máximo e a razão do Raio Inscrito / Raio Circunscrito, aumenta pois os triângulos foram otimizados.

Tabela 1- Média das medidas de qualidade dos modelos original e processado.

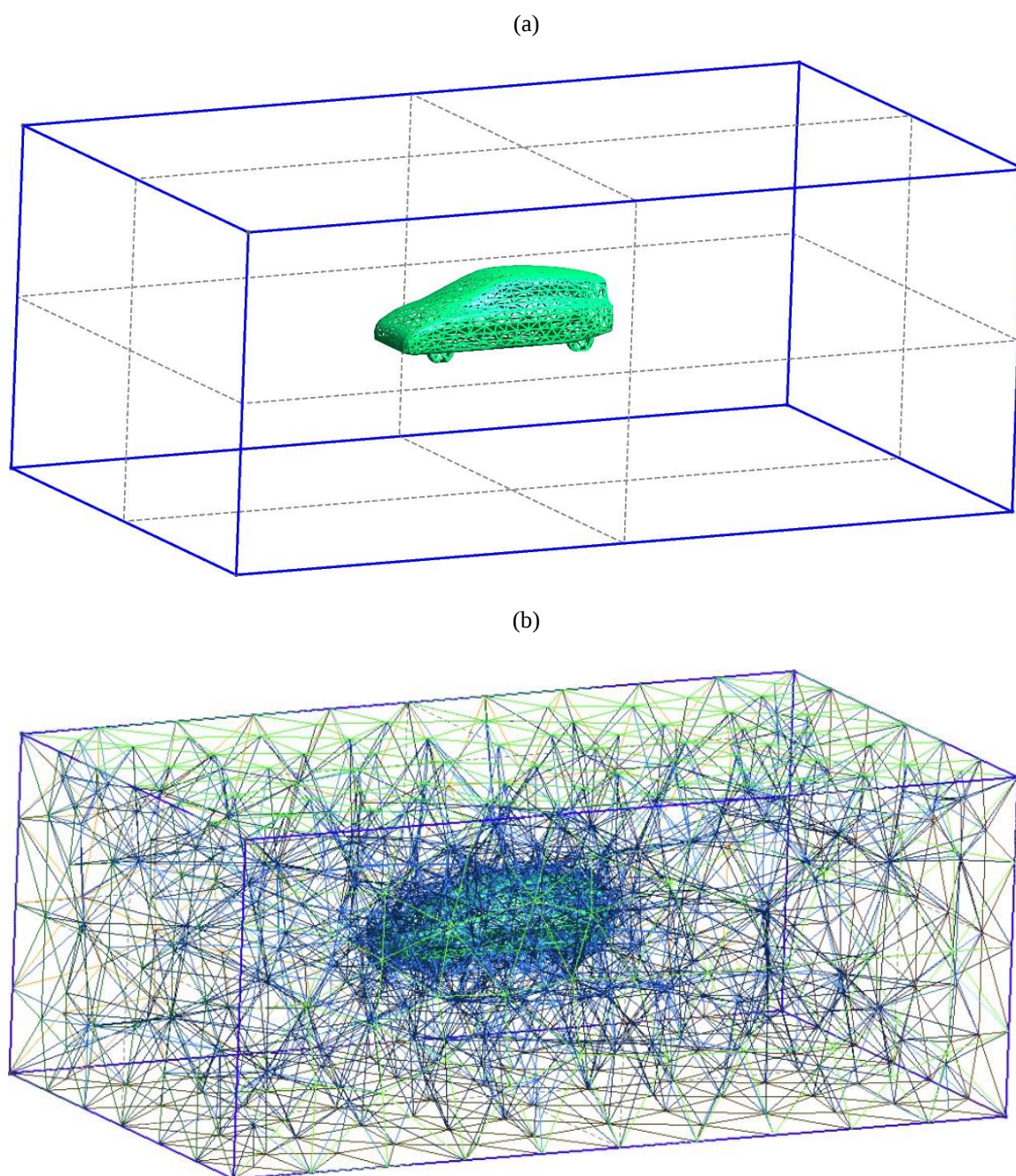
Medida de qualidade Modelo	Área / Lado Máximo	Raio Inscrito / Raio Circunscrito
ASMO - Modelo Original	0,175117	0,293866
ASMO - Modelo Processado	0,360551	0,574756

Fonte: Autoria Própria (2019)

Para se efetuar a solução numérica das equações de Navier-Stokes pelo método dos volumes finitos, simula-se a geometria de um túnel de vento. Para isso, deve-se criar uma malha discreta que representa o espaço entre a malha do objeto tridimensional e as paredes do túnel. Isto pode ser realizado com uso de um *software* gerador de elementos finitos tridimensionais como o *Gmsh*. A figura 5-a mostra uma disposição de teste do modelo do carro ASMO inserido em um túnel de vento. A figura 5-b mostra um exemplo de malha discreta de elementos finitos gerada com o *Gmsh*, a partir do modelo processado neste trabalho. Após a criação dessa malha, emprega-se um solucionador numérico como o *Openfoam* para o cálculo numérico da solução das equações que descreve o escoamento do fluido, dadas as condições de contorno, e de entrada e saída de vento. A figura 6 mostra a visualização, usando o programa de visualização científica *Paraview*, de um resultado da simulação gerada pelo *Openfoam* a partir da malha gerada pelo *Gmsh*, com os vetores representando a velocidade nos pontos da malha, demonstrando que a malha gerada possui estabilidade numérica.

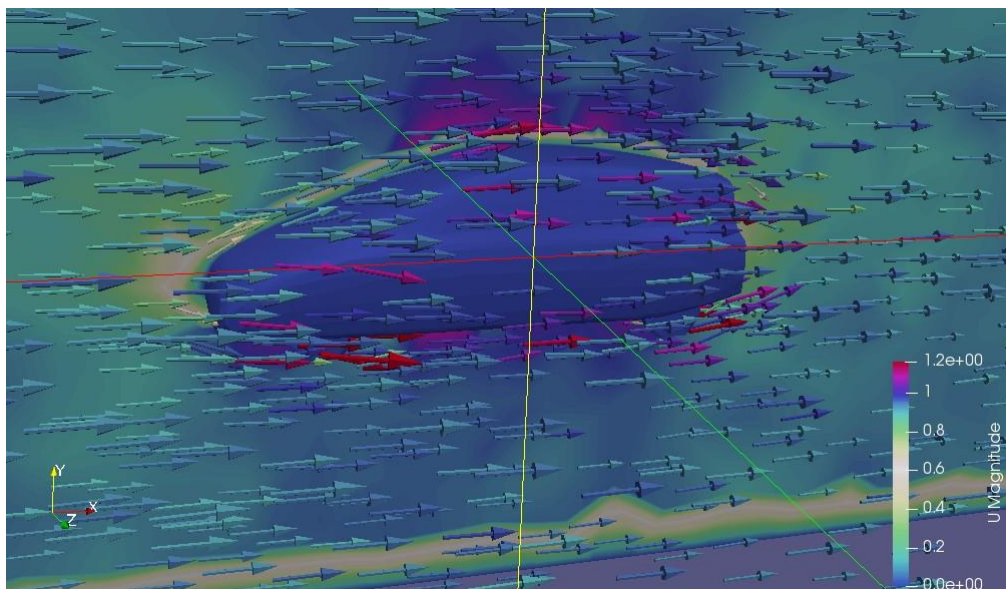
Como o objetivo deste trabalho consiste apenas em efetuar um pré-processamento do modelo tridimensional proposto para torná-lo mais adequado para a solução numérica do escoamento de fluidos, não incluímos aqui detalhes técnicos a respeito das etapas de criação da malha de elementos finitos e de solução numérica do escoamento.

Figura 5 - Modelo inserido no túnel de vento construído a partir do programa *Gmsh* (a) e geração de uma malha discreta (b).



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 6 - Resultado da simulação da DFC usando o *Openfoam* e o programa de visualização científica *Paraview*. Os vetores representam a velocidade no escoamento.



Fonte: Autoria própria (2019)

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, aplicou-se algoritmos de simplificação e de subdivisão ao modelo automotivo ASMO no intuito de adequar a malha à posterior solução numérica das equações de escoamento. A análise da qualidade dos triângulos que compõem a malha processada pelos algoritmos propostos demonstrou que a malha processada possui uma qualidade superior ao modelo original. Erros numéricos, que no processo de solução surgem com frequência, são minimizados com esse tratamento.

Como trabalho futuro, os autores pretendem realizar uma análise aprofundada dos diferentes algoritmos e parâmetros disponíveis para processamento de malhas discretas, correlacionando com os resultados numéricos do processo completo de Dinâmica de Fluidos Computacional.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe que criou o *Meshlab* (*Visual Computing Lab* do *Istituto di scienza e tecnologie dell'informazione*) e ao Programa de Educação Tutorial (PET) do Ministério da Educação do Brasil, dedico aos componentes do meu grupo de amigas e a minha família.

REFERÊNCIAS

- ALJURE, D. E. et al. "Flow and turbulent structures around simplified car models." *Computers & Fluids* 96 (2014): 122-135.
- CENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. São Paulo, 2007.
- CIGNONI, P. et al. "Meshlab: Uma ferramenta de processamento de malha de código aberto." *Sexta conferência eurographics do capítulo italiano*. Página 129-136, 2008.
- FERREIRA-IC, S.; JR-PQ, NIDE. "Análise do escoamento sobre aerofólios usando a técnica dos volumes finitos.", 2015.
- HILLER, J. D.; LIPSON, Hod (2009). "STL 2.0: A Proposal for a Universal Multi-Material Additive Manufacturing File Format". *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*. Vol. 3. 2009.
- GARLAND, M.; HECKBERT, P. S. Surface simplification using quadric error metrics. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 209-216). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. (1997).
- GEUZAIN, C.; REMACLE, J.-F. "Gmsh: A 3 D finite element mesh generator with built in pre and post processing facilities." *International journal for numerical methods in engineering* 79.11, 2009, 1309-1331.
- GRABCAD. GrabCAD Free CAD Library, 2019. Disponível em: <<https://grabcad.com/library>>. Acesso em: 08 de maio de 2019.
- JASAK, H.; JEMCOV, A.; TUKOVIC, Z. "OpenFOAM: A C++ library for complex physics simulations." *International workshop on coupled methods in numerical dynamics*. Vol. 1000. IUC Dubrovnik Croatia, 2007.
- MALISKA, Clovis R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- TAKAGAKI, Luiz Koiti. Tecnologia de Impressão 3D. **Revista Inovação Tecnológica**, São Paulo, v.2, n.2, p.2840, jul./dez.2012.

YZLLA RHAVENA LUCENA

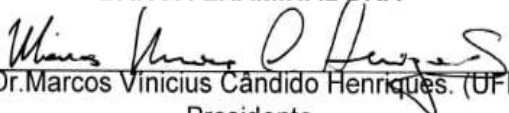
**PRÉ-PROCESSAMENTO DE MODELO DE VEÍCULO ASMO PARA ESTUDO
DE DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

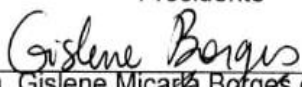
Projeto apresentado ao Conselho do Curso Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito parcial para elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso.

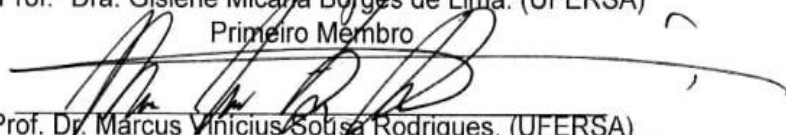
Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinicius Cândido Henriques

Defendida em: 13/08/19.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Marcos Vinicius Cândido Henriques. (UFERSA)
Presidente


Prof.ª Dra. Gislene Micaela Borges de Lima. (UFERSA)
Primeiro Membro


Prof. Dr. Marcus Vinicius Sotiza Rodrigues. (UFERSA)
Segundo Membro